

V. Nagy Zoltán*

LAKÓÉPÜLETEK ÖSSZEHASONLÍTÓ BEÉPÍTETTKARBON ELEMZÉSE

COMPARATIVE EMBODIED CARBON ANALYSIS OF APARTMENT BUILDINGS

KIVONAT / HUN

Az épületekhez köthető szén-dioxid (karbon) kibocsátások elemzése kiemelten fontos az éghajlatváltozás elleni küzdelemben. A teljes karbon kibocsátásra vetítve az üzemeltetéshez kapcsoló rész aránya egyre csökken, köszönhetően a javuló épületenergetikai jellemzőknek, viszont ezzel párhuzamosan az építőanyagok előállításához, az építéshez kapcsolódó rész, a beépített karbon aránya növekszik. A cikkben ismertetett egyszerűsített elemzés az építőanyagok nyilvánosan elérhető Környezetvédelmi Terméknyilatkozatainak felhasználásával, a magyar lakóépülettervezési gyakorlatban használatos épületszerkezeti megoldásokból összeállított lakóépület változatokhoz számít beépített karbonkibocsátás értékeket. Így már koncepciótervi fázisban lehetővé válik a különböző épületszerkezeti megoldásokkal tervezett épületek környezeti szempontú értékelése, azaz a műszaki elképzelések összehasonlítása beépített karbon kibocsátás szerint. A cikk ismerteti egy kétszintes lakóépület esetére elvégzett elemzés főbb tanulságait.

Kulcsszavak:

éghajlatváltozás, szén-dioxid lábnyom, beépített karbon értékelés, lakóépületek

ABSTRACT / ENG

Analysis of building related carbon dioxide emissions is a major focus in the fight against climate change. The emissions associated with use phase of the buildings, called operational carbon, are decreasing due to improved building energy efficiency and the role of embodied carbon associated with construction materials and construction in total emissions is increasing proportionally. This paper presents a simplified method that calculates embodied carbon emission values for building variants assembled from building construction solutions commonly used in Hungarian residential building design practice, using publicly available Environmental Product Declarations for building materials. This enables environmental comparison of buildings at the conceptual design phase, i.e. the ranking of different technical concepts according to their embodied carbon emissions. The article also presents the results learned from the analysis of a two-storey residential building.

Keywords:

climate change, carbon footprint, embodied carbon benchmark, residential building

* okl. építőmérnök, tartószerkezet tervező, e-mail: vnagyvoltan33@gmail.com

A cikkhez kapcsolódó előadás elhangzott a 2nd Ybl Conference on the Built Environment című konferencián, az Óbudai Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Karán, a Parametrikus és generatív tervezés szekcióban, 2024. május 17-én.

1. | BEVEZETÉS

Amikor egy öblítőt leveszünk a polc-ról, akkor annak környezetbarátságáról színes feltűnő feliratok tájékoztatnak. Vásárláskor nem mélyedünk el a különböző vegyi összetevők összehasonlításában, megteszik ezt mások helyettünk, nekünk csak a minősítéseket jelző címkékre kell figyelni. Hasonlóan a háztartási gépekhez, ahol már 1996 óta feltüntetik a készülék energia- és vízfogyasztási jellemzőit, így a készülék ára mellett ez is befolyásolja a döntésünket.

Egy épület tervezése objektív és szubjektív döntésekből áll. Kiválaszthatunk és fontosságuk szerint rangsorolhatunk bizonyos jellemzőket: épületszerkezeti és épületgépészeti megoldásokat, ezekhez tartozó várható építési és üzemeltetési költségeket, funkcionálisitást, esztétikát és környezeti hatásokat. Ezen jellemzők becslésében sok a bizonytalanság, főleg, ha egy építés jövőbeli ökológiai hatásait szeretnénk megismerni. Mérnökként azonban nem idegen tőlünk, komplex kérdések esetén egyszerűsítésekkel éljünk, a fontos jellemzők megőrzése mellett.

A karbonelemzés hasonlítható az épület költségvetési kiírásának elkészítéséhez, csak itt környezeti költségekkel számolunk. Az életcikluselemzés során (LCA, az ISO 14040 és 14044 szabványok szerint) először is meghatározzuk az elemzés célját és hatókörét. Ezt követően leltárt készítünk, listázzuk a szükséges építőanyagokat, építési üzemeltetési, bontási, újrahasznosítási folyamatokat. A leltárelemekhez kibocsátásértékeket párosítunk, melyeket az építőanyagok Környezetvédelmi Ter-

méknilylatkozatai (EPD) tartalmaznak [1]. Ezek szabványosított formátumú és tartalmú, tanúsított dokumentumok, melyet a gyártók készíthetnek önkéntes alapon termékeikhez. A leltárelemzés eredményeként összesített környezeti indikátorértékeket kapunk, melyek az épület életciklusa során kialakuló különböző környezeti hatásokat becsülik (pl. üvegházhatás, ózonréteg károsítás, savasodás, eutrofizáció). Az éghajlatváltozást generáló üvegházhatáshoz hozzájáruló szén-dioxid-kibocsátás (karbon-lábnyom), azaz a GWP (globális felmelegedési index) talán a legismertebb mérőszám, ezt szerepel a jelen elemzésben is [2].

Az épület üzemeltetéséhez kapcsolódó használati karbonkibocsátás csökkentése közös törekvése minden iparági szereplőnek. Könnyű ebben minden az építésben résztvevő és felelősen gondolkodó szereplőnek közreműködni, mivel egy hatékonyabb gépészeti rendszer, jobb hőszigetelés energia-megtakarítást, rezsicsökkenést, ingatlan értéknövekedést jelenthet. Az üzemeltetéshez kapcsolódó kibocsátások csökkentése napjainkban már olyan sikeres, hogy a korábban csak 10-20%-ot kitevő beépített karbon részaránya egyre növekszik a teljes kibocsátáson belül, és a becslések szerint új épületeknél már a 40-50%-ot is elérheti.

Ezzel szemben az építőanyagok előállításához, az építéshez és az utóhasznosításhoz kötődő beépített karbon csökkentése nem feltétlenül jelenti az építési költségek csökkentését. Egy alacsony beépített karbonszintű épület csak szubjektív értéktöbbletet jelenthet az építetőnek, és ez így marad egészen addig, amíg az építési szabályozások pozitív diszkriminációja nem

érvényesül. Néhány európai országban (pl. Franciaország, Hollandia, Egyesült Királyság) az épületek teljes karbon (használati + építési) szabályozására az építési engedélyezési eljárások során már vannak példák [3], és a közeljövőben EU-s szintű előírások is várhatók.

2. | ALMÁT AZ ALMÁVAL

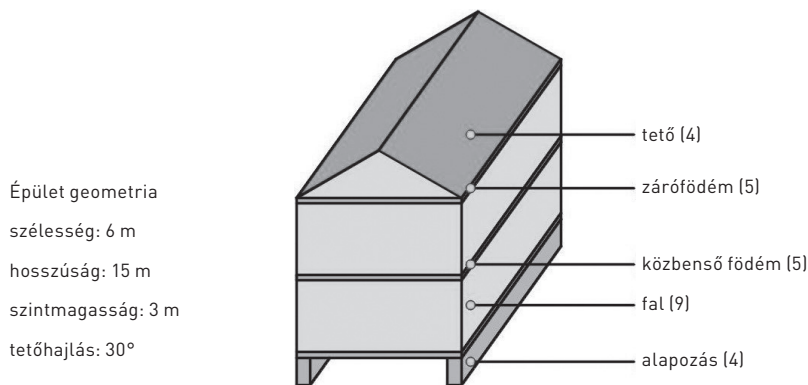
Hogyan lehet a különféle műszaki megoldásokkal tervezett épületeket beépített karbon szerint minősíteni, rangsorolni?

Az egyik lehetőség, hogy olyan minősítési értékeket használunk, melyek már megtervezett épületek adataiból összeállított, épülettípusok szerint szétválogatott adatbázisok elemzéséből származnak. Ez jó megközelítés, azonban probléma lehet az adatok hiánya, az adatok inhomogenitása (épületgeometriák, rétegrendképzések különbözősége, eltérő leltárképzések). Ezen torzító hatások miatt olyan elemekből állhat az elemzett adathalmazunk, hogy végül nem az almát az almával hasonlítjuk össze.

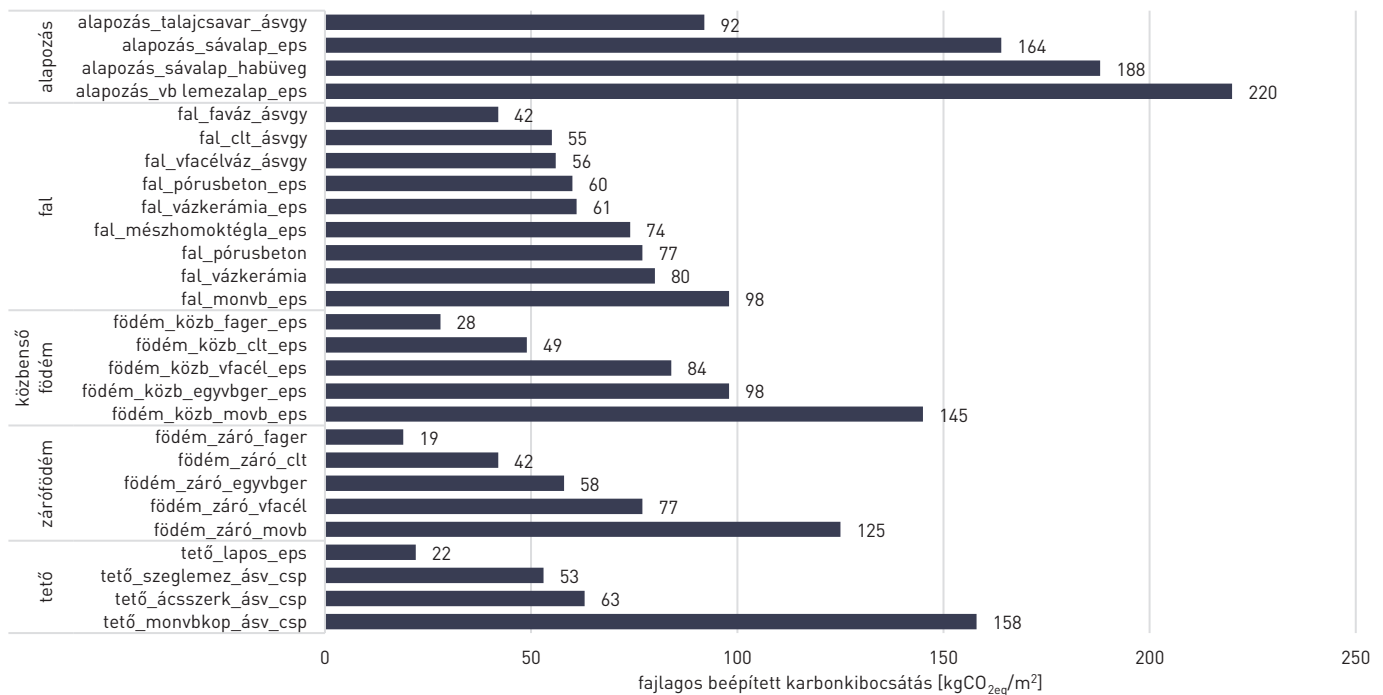
A másik megközelítés az, mely során az elemzett épületek adatbázisát nem megvalósult, hanem virtuálisan generált változatokból állítjuk össze. Olyan épületekből, melyeket a tervezési gyakorlatban előforduló épületszerkezeti megoldásból (alapozás, földem, tető) állítunk össze.

Az elemzési módszer bemutatására az **1. ábra** szerinti egyszerűsített lakóépülettel foglalkoztunk. Az ábrán jelzett épületrészek esetében különféle épületszerkezeti altípusokat különböztettünk meg, melyek száma zárójelben szerepel. Az épületrészek altípusaiból teljes kombinációval egy virtuális épületadatbázist képeztünk, majd ezekből kiszűrtük a műszakilag lehetséges épületváltozatokat. Például egy CLT falas épület esetében nem készülhet vasbeton földem. Az így összeállított épület adatbázis minden eleméhez számítottuk az összesített beépített karbonkibocsátás értékeket. Az épületrészekkel szemben támasztott műszaki követelmények egységesek, így homogen adatbázisra vonatkozik az elvégzett környezeti értékelés.

Fontos kiemelni, hogy ez a módszer komoly egyszerűsítéseket tartalmaz



1. ÁBRA: Az elemzés során megkülönböztetett épületrészek és altípusaik száma



2. ÁBRA: Az épületszerkezetekhez tartozó fajlagos beépített karbonkibocsátás értékek

egy hagyományos életcikluselemzéshez képest. Mivel konkrét termékek EPD-jéből származnak a kibocsátási értékek, ezért az elemzés csak ezen építőanyagok használata esetén érvényes. Fontos továbbá, hogy a beépített karbonkibocsátás csak az építőanyagok kitermelése és előállítása során a légkörbe jutó szén-dioxid mennyiségére ad becslést. Ez csak egy környezeti indikátor a sok közül, és így nem adhat teljes képet egy építés komplex ökológiai hatásairól. Az elemzés csak egy korlátozott elemű ún. „core” szintű leltáron alapul, melyből hiányoznak a nyílászárók, válaszfalak. A fa- illetve betonszerkezeteknél a szén-dioxid-megkötés (sequestration) figyelembevételétől eltekintettünk [4]. Az szállítás, építési folyamat, karbantartás, bontás, utóhasznosítás kibocsátásai nem részei az elemzésnek, csak az építőanyagok előállításával járó kibocsátás (upfront carbon A1-A3).

Fenti egyszerűsítések mellett a koncepcionális tervezés támogatására egy ilyen elemzés hasonlóan hasznos lehet a környezeti hatás becslésében, mint például a tartószerkezettervezésben az előzetes méretfelvételek során használt egyszerűsített statikai számítások, ökölszabályok alkalmazása [5].

3. | AZ ÉPÜLETSZERKEZETEK BEÉPÍTETTKARBON ELEMZÉSE

Az elemzés a magyar lakóépület-építési gyakorlatban előforduló épület-szerkezeti megoldások áttekintésével kezdődött. A **2. ábrán** jelzett négy féle épületszerkezetet különböztettem meg: alapozás, fal, közbelső födém, zárófödém, tető. A szerkezetek különböző altípusait réteges szerkezetként állítottam össze, azonos mechanikai (MSZ EN) és hőtechnikai elvárásoknak (ÉKM) megfelelően. Az elemzéshez használt algoritmus a Rhinoceros 3D (CAD) programon belül futó Grasshopperben készült [6].

A **2. ábrán** szerepelnek a vizsgált épületszerkezeti változatok megnevezései, illetve a hozzájuk tartozó számított fajlagos karbonkibocsátás értékek. Azon elemeknél, ahol hőszigetelés is tartalmaz a térdreng, ott ennek típusát is feltüntettem. Az alapozásnál és a földemknél a padlószervezetet is figyelembe vettem, de burkolat nélkül. A falazatoknál, ahol nem szerepel a hőszigetelés jelölése (leps, ásvgy) ott a fal olyan vastagságú, ami önmagában is teljesíti a vonatkozó hőátbocsátási követelményt. A tető típusoknál a lapostető kialakítás csak a záróföldemre

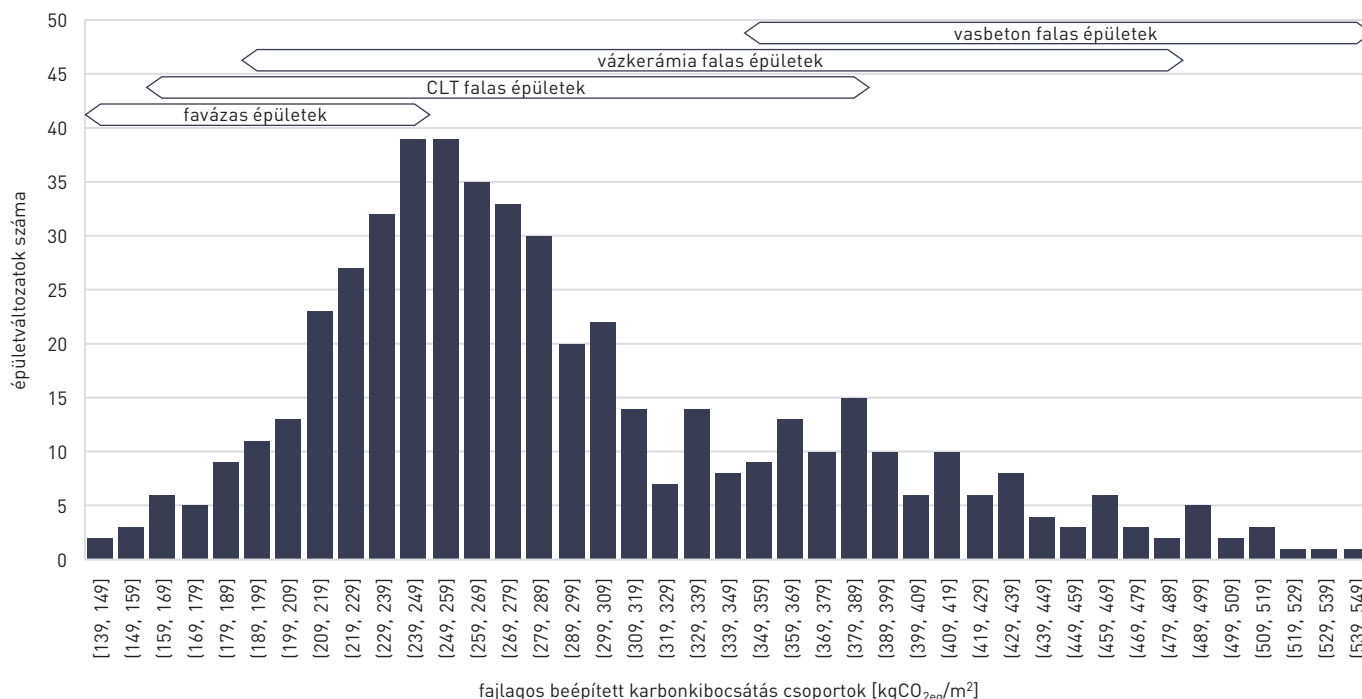
kerülő rétegrendet tartalmazza, míg a magastetős változatoknál a tető szerkezetét is számításba vettem.

Az építőanyagok között három magas kibocsátású szereplőt lehet azonosítani: a betont (a cement miatt), az acélt és a hőszigeteléseket. Az elemzésben használt kibocsátás értékek: hőszigetelések [eps, ásványgyapot] 77 ill. 133 kgCO_{2,eq}/m³, monolit beton 240 kgCO_{2,eq}/m³, acél 818 kgCO_{2,eq}/t.

A számított fajlagos kibocsátásértékeket az is erősen befolyásolta, hogy vázas és tömör kialakításnál látványosan eltért a m^2 -enkénti anyagfelhasználás. Például, ha egy 6 m-es támasz közötti monolit vasbeton födém szerkezeti vastagsága 20 cm, akkor a vele műszakilag egyenértékű fáfödém, 10/24-as BSH fagerendákból 60 cm-es osztással építve, csak 20%-os fajlagos m^3/m^2 anyag igényű.

A könnyűszerkezetes épületek alapozására használt talajcsavaros, talpgerendarácsos, száraz úsztatott rétegrendű kialakításhoz tartozó kibocsátásérték a fele, mintha ezt az épületet vasbeton lemezalappal terveznék. A beton sávalaphoz 15%-kal alacsonyabb érték tartozik, mint a lemezalapozáshoz.

A falaknál az ásványgyapottal hőszigetelt fa bordavázás kialakítás, melyben



3. ÁBRA: Az épületváltozatokhoz tartozó fajlagos beépített karbonkibocsátás értékek eloszlása

KVH fabordákat OSB és gipszkarton lemezekkel burkolunk, a legalacsonyabb kibocsátású változat. Ezt követi a CLT falas (ragasztott fa panel) kialakítás, melynél vékony, 10 cm-es fal felület-szerkezetként már a bordavázhoz képest nagyobb a fajlagos anyagigény, így nagyobb kibocsátású a kialakítás. A falazott szerkezeteknél a nagy szilárdságú mészhomok téglá már 20 cm-es falvastagsággal tervezhető, ugyanakkor ez a kis vastagság sem kompenzálja a fajlagosan nagy szén-dioxid lábnyomot. A diagramból az is látható, hogy kedvezőbb értékeket kapunk, ha nem falazat vastagsággal, hanem kiegészítő hőszigeteléssel teljesítjük az energetikai követelményeket.

A födémeknél a leglátványosabb a különböző szerkezeti kialakítások kibocsátásainak az eltérése. Egy száraz rétegrendű BSH fa gerendás födémhez tartozó kibocsátásérték az esztrichbetonos úsztatott rétegrendű padlóval készülő monolit vasbeton síklemeznek csak 20%-a. A zárófödémek abban térnek el a közbenső födémektől, hogy itt nem készülnek padlórétegrendek, illetve terhelésük alacsonyabb, és ezért kisebb szerkezeti méretekkel tervezhetők. Az előregyártott gerendás bélés-teszt vasbeton födém esetében a zárófödémnél nem használtunk felbetont,

így nem jelentkezik az ehhez tartozó magas kibocsátásérték.

A tetőknél a lapostető csak hő- és vízszigetelést tartalmaz, szerkezetet nem, értéke ennek megfelelően alacsony. A szeglemezes tartó alacsonyabb fajlagos fa felhasználása miatt kedvezőbb. Végül a nagy hőcsillapítású monolit vasbeton koporsófödém mintegy háromszoros kibocsátásérték jelentkezik a faszervezetekhez képest.

4. | AZ ÉPÜLETEK BEÉPÍTETTKARBON ELEMZÉSE

Nézzük mi történik, ha az előző pontban elemzett épületrészekből virtuális épületeket állítunk össze. A szerkezetek kombinálásával 510 különböző virtuális épületet alkottam az épületszintű karbonkibocsátás vizsgálatához.

A 3. ábrán szerepelnek a különböző épületváltozatok összesített fajlagos kibocsátásértékeinek eloszlása. Mivel az épületrészek karbonértékei nagy eltéréseket mutattak várható volt, hogy ennek hatása jelentkezik majd a belőlük összeállított épületeknél is. A legkisebb és a legnagyobb érték között majd négyszeres a különbség, ami azt jelzi, hogy a tervezés mozgástere igen nagy.

A négyféle faltípussal (faváz, CLT, téglá, vasbeton) készülő épületekhez tartozó tartományokat nyilakkal jelöltem.

Az alsó értékek zömmel a tisztán fa megoldásokhoz tartoznak, a legtöbb épületváltozatot a 209-309-es közbenső értéktartományba generáltam különböző falazat típusokkal, majd a legmagasabb kibocsátások a monolit vasbeton falakat tartalmazó megoldások esetén jellemzőek.

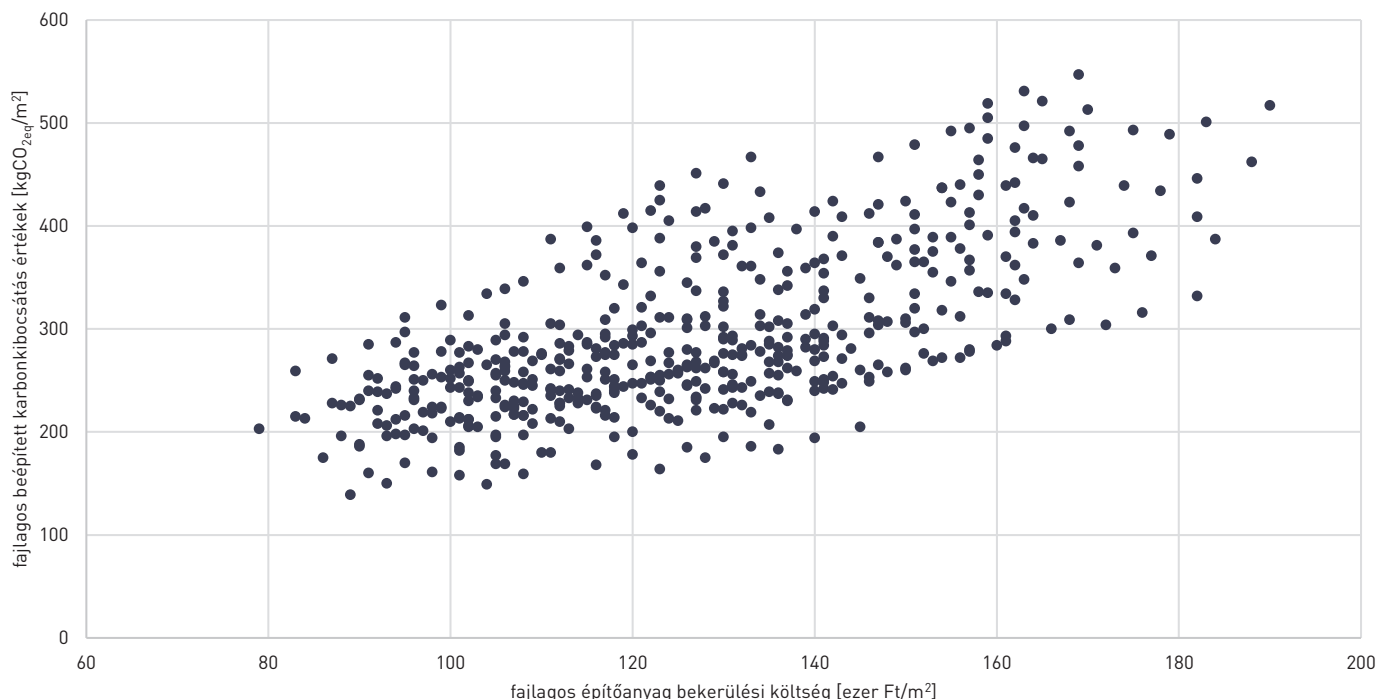
Három jellemző épületet emelnék ki a generált változatok közül, a legkisebb, a legnagyobb és az átlagos kibocsátású változatot:

Legalacsonyabb kibocsátás: 139 kgCO₂/m²

- alapozás: talajcsavar, fa talpgerenda, ásványgyapot hőszigetelés, szárazaljazat
- fal: fa bordaváz, ásványgyapot hőszigeteléssel
- födém: fagerendás födém, EPS úsztatás, szárazaljazat
- tető: lapostető

Legmagasabb kibocsátás: 547 kgCO₂/m²

- alapozás: vasbeton lemezalap, EPS hőszigetelés, aljzatbeton
- fal: monolit vasbeton fal, EPS hőszigetelés
- födém: monolit vasbeton lemez, EPS úsztatás, aljzatbeton
- tető: monolit vasbeton koporsófödém, ásványgyapot hőszigetelés



4. ÁBRA: Az épületváltozatokhoz tartozó fajlagos beépített karbonkibocsátás értékek és a fajlagos építőanyag bekerülési költség összefüggései

Átlagos kibocsátás: 292 kgCO₂/m²

- alapozás: vasbeton lemezalap, EPS hőszigetelés, aljzatbeton
- fal: vázkerámia, EPS hőszigetelés
- födém: CLT fapaneles födém, EPS úsztatás, szárazaljzat
- tető: ácsszerkezet, ásványgyapot hőszigetelés

5. | ÉPÍTŐANYAGOK BEKERÜLÉSI KÖLTSÉGÉNEK ÉS KARBONKIBOCSÁTÁSÁNAK ÖSSZEFÜGGÉSE

Ha az épületek környezeti hatáselemzése párhuzamos költségelemzéssel jár, az segít megérteni a „környezeti” és pénzületi költségek összefüggését. Az elemzésben 2023 novemberi tervezési munkák költségvetési kiírásainál használt építőanyag árakat használtam fel. Az 4. ábra diagramjának vízszintes tengelyén az épületváltozatok összesített építőanyag bekerülési költségének értékei szerepelnek, míg a függőleges tengelyen a hozzájuk tartozó összesített karbon kibocsátásértékek.

Azt láthatjuk, hogy a teljes tervezési spektrumra jellemző, hogy adott költség-szinthez tartozó karbonszintekben nagy eltérések adódnak. Ez azt jelenti, hogy a környezetbarát szemléletű ter-

vezés nem jelent automatikusan költségesebb tervezést, illetve azt is mutatja, hogy érdemes különböző műszaki megoldásokat mérlegelni, hiszen a kibocsátásokban jelentős csökkentések érhetők el az épület drágítása nélkül.

6. | ÖSSZEFOGLALÁS

Az ismertetett elemzési módszer nyilvánosan elérhető Környezetvédelmi Terméknyilatkozatok adataira épülő egyszerűsített megközelítése a lakóépületek beépített karbonszint szerinti értékelésének, rangsorolásának. A magyar tervezési gyakorlatban előforduló műszaki megoldásokból kombinált virtuális épületadatbázis elemzése bemutatta a különböző megoldások környezeti hatásaiban jelentkező jelentős különbségeket. A favázás épületek kiugróan alacsony kibocsátásúak, ezt követik a CLT fapaneles kialakítások, a különböző falazatok, vázkerámiák, pórusbetonok, mészhomoktéglák és végül a vasbeton szerkezetek.

Azért, hogy a normál tervezési gyakorlatban rejtőző lehetőségeket bemutassuk az elemzett szerkezetek szándékosan nem szűk körben használt speciális környezettudatos (pl. döngölt

fal, vályog, szalmabála fal) kialakítások voltak, hanem a kivitelezésben általánosan elterjedt megoldások. Az elvégzett elemzés azt mutatta, hogy a tervezés szerepe kiemelten fontos a kibocsátáscsökkentésben, és minden mérnök előtt nyitva áll a lehetőség, hogy a klímaváltozással szemben érzett egyéni felelősségérzetétől vezérelve, elemezze műszaki megoldásainak beépített karbonkibocsátását, és ennek eredményeit figyelembe vegye munkája során.

HIVATKOZÁSOK

- [1] EPD-Online Platform: Institut Bauen und Umwelt e.V (IBU), <https://epd-online.com>
- [2] O. P. Gibbons, J. J. Orr, C. Archer-Jones, W. Arnold, D. Green: How to calculate embodied carbon, The Institution of Structural Engineers, 2022, <https://www.istructe.org/resources/guidance/how-to-calculate-embodied-carbon/>
- [3] oneClickLCA: Regulations and policies driving embodied and whole life carbon, weboldal, <https://www.oneclicklca.com/regulations-and-policies-driving-embodied-and-whole-life-carbon/>
- [4] Will Hawkins: Timber and carbon sequestration, The Structural Engineer 99 (1), 2021, 18-20, <https://doi.org/10.56330/ALFK4016>
- [5] Mahsa Torabi, Ralph Evins: Towards net-zero carbon buildings: Investigating the impact of early-stage structure design on building embodied carbon. The International Journal of Life Cycle Assessment (2024), <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02287-w>
- [6] Grasshopper Community, Forum, Grasshopper Algorithmic Modelling, <https://www.grasshopper3d.com/>